

На правах рукописи

ЛАПШИН
Денис Александрович



**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ
ВНУТРИОБЪЕКТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ
РЕАКТОРОВ ТИПА БН В АВАРИЯХ С ПАДЕНИЕМ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Нижний Новгород – 2015

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»)

Научный руководитель:

доктор технических наук

Кайдалов Виктор Борисович

Официальные оппоненты:

Шклярчук Федор Николаевич, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Институт прикладной механики РАН, главный научный сотрудник отдела механики адаптивных композиционных материалов

Петров Михаил Васильевич, доктор технических наук, доцент, Чебоксарский государственный университет им. И.Н. Ульянова, профессор кафедры строительных конструкций

Ведущая организация – **ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН, Н. Новгород**

Защита состоится "30" декабря 2015 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н.Новгород, проспект Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте diss.unn.ru/559

Автореферат разослан "27" ноября 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Горохов Василий Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии (ОИАЭ).

Особое место на ОИАЭ занимают системы хранения и транспортирования ядерного топлива (СХТЯТ) вследствие существования потенциальной возможности (в детерминистской постановке) возникновения аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций (ТТО), что может привести к серьёзным радиационным последствиям.

Для транспортировки радиоактивных материалов применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта (ВТУК), обеспечивающего ядерную и радиационную безопасность. В конструктивном исполнении контейнер является сложным и дорогостоящим изделием. Он должен отвечать требованиям динамической прочности конструкции, подвергающейся воздействию ударных нагрузок высокой интенсивности, обладать при этом определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки на транспортируемое оборудование.

Существующая нормативная база прочности не содержит каких-либо количественных критериев допустимости повреждения контейнера при аварийном падении. Проведение представительных натурных испытаний контейнера в процессе отработки его конструкции затруднено, прежде всего, в силу его значительной стоимости. Математическая формулировка отмеченных динамических процессов сводится к решению нелинейной трехмерной нестационарной задачи механики деформируемого твердого тела. Решение подобных задач возможно только на основе компьютерного моделирования с применением современных программных комплексов на многопроцессорных вычислительных системах и экспериментальном изучении свойств материалов, что определяет актуальность темы.

Степень разработанности темы диссертации Существующая нормативная база прочности не содержит в настоящее время каких-либо количественных критериев оценки допустимости повреждения ВТУК в авариях подобного типа.

Целью данной работы является расчётно-экспериментальный анализ процессов деформирования конструкций транспортных контейнеров с находящимся в них наполнением в условиях ударного воздействия и их оптимизация на стадии проектирования с учетом нормативных требований по ударостойкости и нормативных параметров радиационных последствий. Для достижения указанной цели решаются следующие **задачи**.

1. Проведение расчетных и экспериментальных исследований динамических характеристик конструкционных материалов и определение на их основе параметров математических моделей, описывающих нелинейное деформирование материалов ВТУК.

2. Разработка и верификация основанных на МКЭ компьютерных моделей для расчётов напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций ВТУК при ударном нагружении.

3. Расчетное и экспериментальное исследование деформирования макетов гильзы системы управления и защиты (СУЗ) и тепловыделяющих сборок (ТВС), валидация компьютерных моделей.

4. Численное исследование кинетики напряженно-деформированного состояния ВТУК в условиях ударного контактного взаимодействия.

5. Выполнение расчетных оценок целостности и степени разгерметизации ВТУК в процессе транспортно-технологических операций с учётом сформулированных критериев повреждений применительно к случаям постулированного аварийного падения.

Научная новизна работы заключается:

а) в расчетно-экспериментальном исследовании физико-механических свойств конструкционных материалов и определение параметров математической модели при высокоскоростном деформировании и разрушении;

б) в построении сценариев постулируемых аварий на основе анализа транспортно-технологического тракта (ТТТ) и нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ;

в) в получении новых расчетно-экспериментальных данных о прочности и безопасности конструкции ВТУК при аварийном падении на жесткое основание.

Достоверность полученных результатов подтверждается теоретическими и экспериментальными данными по упругопластическому деформированию многокомпонентных конструкций в условиях ударных нагрузок.

Теоретическая значимость работы обусловлена:

- расчетно-экспериментальным исследованием влияния скорости нагружения на деформирование конструкционных материалов;

- разработкой, верификацией и валидацией компьютерных моделей, позволяющих обосновывать прочность и герметичность контейнеров в аварийных ситуациях, связанных с их постулированным падением в процессе проведения транспортно-технологических операций.

Разработанный в диссертационной работе подход экспериментально-теоретического исследования прочности ВТУК носит комплексный характер и охватывает технические, физико-механические, математические, вычислительные и нормативные аспекты проблемы. Его применение позволило аттестовать ПК ANSYS/LS-DYNA в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.), получить достоверные результаты оценки динамической прочности ВТУК и обеспечить выполнение нормативных требований безопасности.

Практическая значимость работы заключается в использовании результатов расчетного и экспериментального анализа динамической прочности транспортных контейнеров

с радиоактивными материалами в аварийных ситуациях при разработке и корректировке технического проекта реакторной установки типа БН, что позволило сократить дорогостоящие натурные испытания и способствовало повышению конкурентоспособности изделий.

Методология и методы исследования Принятая в диссертационной работе методология исследования основана на комплексном применении средств компьютерного моделирования и натурных испытаний.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0026.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1 Результаты расчетно-экспериментального исследования динамического поведения конструкционных материалов, идентификации и верификации математических моделей упруго-пластического деформирования, применительно к аварийным ситуациям.

2 Результаты верификации и валидации применяемой вычислительной модели в рамках программного комплекса ANSYS/LS-DYNA.

3 Результаты решения прикладных задач, исследования особенностей динамических процессов деформирования ВТУК.

4. Рекомендации по корректировке технического проекта реакторной установки типа БН.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации обсуждались на НТС АО «ОКБМ Африкантов» (г. Н.Новгород), XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (г. Санкт-Петербург, 2015), XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г.Алушта, 2015), Международной конференции «Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики» (г. Димитровград, 2014г.), Всероссийской конференции «Проблемы прочности, динамики и ресурса» (г. Н. Новгород, 2014), XII Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» (г. Санкт-Петербург, 2012), отраслевой научно-технической конференции «Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем» (г. Н.Новгород, 2011), III международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (г. Москва, 2014г.), VIII и IX научно-технической конференции «Молодежь в науке» (Нижегородская область, г. Саров, 2009,2010), 17-ой Нижегородской сессии молодых ученых» (г. Н.Новгород, 2010), XIV Нижегородской сессии молодых ученых «Технические науки» (г. Н.Новгород,2009г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-8]. Работы [1-3] опубликованы в сборнике из списка ВАК.

Личный вклад автора. Соискателем выполнены:

- а) разработка программы и участие в проведении экспериментальных исследований динамических свойств конструкционных материалов, используемых во ВТУК [6,7];
- б) разработка программы и участие в проведении испытаний макетов тепловыделяющих сборок (ТВС) и гильзы системы управления и защиты (СУЗ) активной зоны реактора БН-800 при ударном нагружении [8];
- в) верификация и валидация программного комплекса ANSYS/LS-DYNA применительно к исследуемому классу задач [2,3,5];
- г) определение сценариев постулируемых аварий на основе анализа транспортно-технологического тракта и нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ [8];
- д) разработка и обоснование компьютерных моделей деформирования ВТУК в условиях ударных нагружений [1-3];
- е) расчетно-экспериментальные исследования прочности и безопасности ВТУК при аварийном падении на жесткое основание [2,3].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 259 наименований и 4 приложений. Работа содержит 222 страницы основного текста, 159 рисунков и 29 таблиц

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения:

Во введении обоснована актуальность компьютерного и экспериментального анализа процесса деформирования ВТУК при динамическом нагружении с целью создания конструкций, удовлетворяющих требованиям ударостойкости в аварийных ситуациях, и обеспечения радиационной безопасности при проведении транспортно-технологических операций.

В первой главе приведен обзор математических моделей, численных методов и программных кодов, которые используются для исследования нестационарного деформирования сложных составных конструкций, формулируются цели диссертационной работы.

В общем случае поведение конструкционных материалов описывается уравнениями механики сплошных сред. Для описания упругопластического деформирования материала используются соотношения теории пластичности. Вопросам построения математических моделей в теории пластичности посвящены работы А.А. Ильюшина, В.В. Новожилова, Ю.Н. Работнова, И.А. Биргера, В.С. Бондаря, Р.А. Васина, В.Г. Зубчанинова, Ю.И. Кадашевича, Л.М. Качанова, Ю.Г. Коротких, И.В. Кнетса, Н.Н. Малинина, Б.Е. Мельникова, Ю.М. Темиса, С.А. Шестерикова, В.Н. Кукуджанова и многих других ученых. На практике наибольшее

распространение получили деформационная теория пластичности и теория течения. Теории течения имеют более широкую область применимости и более удобны в численной реализации, чем теории деформационного типа. Они в состоянии описывать сложное поведение материалов с учетом упрочнения, влияния скорости деформации, эффекта Баушингера, температурных условий и т.д. Однако, для задания параметров этих моделей и их верификации необходимы экспериментальные данные испытаний материалов в широких диапазонах скоростей деформации и температур. Обзоры методов и результатов испытаний металлов и сплавов представлены в работах Беляева В.И., Ващенко А.П., Степанова Г.В., Токарева В.М., Леонова В.П., Мотовилиной Г.Д., Эглит А.С., Николаса Т., Campbell J.D., Lindholm U.S., Muller T.

Диаграммы деформирования конструкционных материалов обладают определенной чувствительностью к режиму нагружения. Исследованию этого вопроса посвящены работы Брагова А.М., Галкина А.М., Гун Г.Я., Николас Т., Полухин П.И., Lindholm U.S., Duffy J., Stelly M., Kawashima S., Kawamura R., Lindholm U.S. В большинстве «промышленных» пакетов программ численного анализа нелинейных задач динамического деформирования конструкций при ударном нагружении, применяют модели Джонсона-Кука и Зерилли-Армстронга, в явном виде учитывающие влияние скорости деформаций на диаграмму деформирования.

Интегрирование разрешающей системы уравнений, описывающей динамические нелинейные процессы деформирования сложных конструкций, возможно только при использовании численных методов и современной вычислительной техники. Обзор основных подходов к численному решению задач механики сплошных сред можно найти в работах С.К. Годунова, Н.С. Бахвалова, Г.И. Марчука, В.Н. Кукуджанова, Б.Е. Победри, В.Г. Баженова, С.А. Капустина, А.И. Гулидова, Н.Г. Бураго, А.И. Корнеева, А.Б. Киселева, А.С. Сахарова и других авторов. Применительно к рассматриваемому классу задач можно выделить метод конечных элементов как наиболее универсальный. Подробное описание метода конечных элементов можно найти в работах А.И. Голованова, В.А. Постнова, С.А. Капустина, В.Е. Хорева, Н.Т. Югова, G.R. Johnson, К.-У. Bathe, Т. Belytschko, О.С. Zienkiewicz. Развитию методов численного моделирования контакта деформируемых элементов конструкций посвящены работы В.Г.Баженова, А.И. Гулидова, А.Б. Киселева, А.И. Кибеца, А.И. Корнеева, А.И. Садырина, Н.Г. Бураго, В.Д.Кошура, М.Уилкинса, G.R.Johnson и других авторов.

Анализ публикаций показал, что стратегия оценки прочности и безопасности контейнеров для хранения и транспортировки радиоактивных материалов в настоящее время существенно изменилась в сторону применения численных методов. Результаты исследований Н.А. Абросимова, В.Г. Баженова, Б.П. Барканова, В.Б. Кайдалова, А.И. Кибеца, А.А. Рябова, В.И. Романова, В. Droste, Т. Quercetti, V. Ballheimer, G. Wieser, S. König, R. Diersch, M. Neumann и многих других ученых, подтвердили эффективность применения программных комплексов для анализа динамической прочности контейнеров. Однако такие исследования

требуют выполнения большого объема экспериментальных работ по обоснованию применяемых математических моделей и оснащению их необходимыми параметрами.

Во второй главе приводится определяющая система уравнений для описания процессов деформирования упругопластических элементов конструкций, конечно-элементная методика ее решения, а также результаты верификационных расчетов.

Для описания деформирования конструкции применяется текущая лагранжевая формулировка. Компоненты тензора скоростей деформаций определяются в метрике текущего состояния

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i})/2, \quad \dot{U}_{i,j} = \partial \dot{U}_i / \partial X_j, \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad X_i = X_i|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_i dt \quad (1)$$

Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей работы:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_p} P_i \delta \dot{U}_i d\gamma + \int_{\Gamma_q} P_i^q \delta \dot{U}_i d\gamma, \quad (i, j = \overline{1,3}), \quad (2)$$

где ρ — плотность; P_i^q — контактное давление; P_i — распределенная нагрузка; Ω — исследуемая область; Γ_q — поверхность контакта; Γ_p — зона действия внешнего давления; $\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$, $\delta \dot{U}_i$ — вариации $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{U}_i$ (на поверхности с заданными кинематическими граничными условиями $\delta \dot{U}_i = 0$).

В осесимметричной постановке задачи X_1 — ось вращения, X_2 — радиус, x_1 — меридиональная координата, x_3 — азимут. Скорости деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$ определяются следующим образом

$$\dot{\varepsilon}_{11} = \dot{U}_{1,1}, \quad \dot{\varepsilon}_{22} = \dot{U}_{2,2}, \quad \dot{\varepsilon}_{33} = \dot{U}_2 / X_2, \quad \dot{\varepsilon}_{12} = (\dot{U}_{1,2} + \dot{U}_{2,1})/2, \quad \dot{\varepsilon}_{13} = \dot{\varepsilon}_{23} = 0 \quad (3)$$

Уравнение баланса виртуальных мощностей работы записывается в следующем виде

$$\int_{\Omega} (\sigma_{11} \delta \dot{\varepsilon}_{11} + \sigma_{22} \delta \dot{\varepsilon}_{22} + \sigma_{33} \delta \dot{\varepsilon}_{33} + 2\sigma_{12} \delta \dot{\varepsilon}_{12}) X_2 d\Omega + \int_{\Omega} (\rho \ddot{U}_1 \delta \dot{U}_1 + \rho \ddot{U}_2 \delta \dot{U}_2) X_2 d\Omega = \int_{\Gamma_p} (P_1 \delta \dot{U}_1 + P_2 \delta \dot{U}_2) X_2 d\gamma + \int_{\Gamma_p} (P_1^q \delta \dot{U}_1 + P_2^q \delta \dot{U}_2) X_2 d\gamma \quad (4)$$

В качестве уравнений состояния применяются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Упрочнение материала описывается моделью Джонсона-Кука:

$$\sigma_{JC} = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (5)$$

где A , B , C , n и m — постоянные материала; ε_p — эффективная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ — безразмерная пластическая скорость деформации ($\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$); $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$ — модифицированная гомологическая температура; $T_0 = 293 \text{ К}$ и $T_m = 1723 \text{ К}$ — соответственно температура окружающей среды и температура плавления материала. Параметры модели

определяются по результатам экспериментальных исследований поведения конструкционных материалов при статическом и динамическом нагружениях.

Для оценки динамической прочности ВТУК в качестве критерия состояния принята относительная деформация. Условие прочности конструкции имеет вид

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{пред} \quad (6)$$

где ε - интенсивность пластической деформации, $\varepsilon_{пред}$ - деформация разрушения, определяемая в испытаниях на растяжение цилиндрического образца по относительному сужению Z^T его поперечного сечения в месте разрыва.

$$\varepsilon_{пред} = \ln[1/(1 - 0,01 \cdot Z^T)] \quad (7)$$

Поскольку образование шейки в цилиндрическом образце характеризуется неоднородным напряженно-деформированным состоянием для определения $\varepsilon_{пред}$ применяется расчетно-экспериментальный подход, основанный на комплексном использовании компьютерного моделирования и натурного эксперимента.

Определяющая система уравнений дополняется начальными условиями и граничными условиями. Положение контактной поверхности и контактные усилия в общем случае неизвестны и определяются в ходе решения поставленной задачи.

Решение определяющей системы уравнений основано на моментной схеме метода конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа “крест”. Расчетная область покрывается лагранжевой сеткой из 4-узловых конечных элементов (двумерная задача) и 8-узловых конечных элементов (трехмерная задача). Компоненты скорости перемещений узлов КЭ аппроксимируются внутри элемента с помощью полилинейных функций формы. Скорости деформаций аппроксимируются линейными функциями в виде суммы безмоментных и моментных составляющих исходя из соотношений (1),(3). При выполнении численного интегрирования в (2), (4) применяются квадратурные формулы. После замены интегрирования по области Ω суммированием по элементам получается дискретный аналог уравнений движения:

$$[M]\{\ddot{U}\} = \{F\} \quad (9)$$

где $[M]$ — диагональная матрица масс; $\{\ddot{U}\}, \{F\}$ — векторы, составленные из ускорений узлов КЭ-сетки и результирующих узловых сил в общей системе координат.

Изложенная схема метода конечных элементов реализована в рамках вычислительного комплекса ANSYS/LS-DYNA (лицензия № D334623 от 02.06.2005 г.). Для аттестации ANSYS/LS-DYNA в научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ) на ряде тестовых задач проведена его верификация. Согласно результатам верификации относительная погрешность решения упругих задач по напряжениям,

коэффициенту динамичности и ускорению не превышает 4,4 %. Погрешность решения задач упругопластического деформирования не превышает 15 %.

Проведено численное и экспериментальное исследование ударного деформирования макета гильзы системы управления и защиты СУЗ 927М.03.000 (рисунок 1) и макета тепловыделяющей сборки ТВС 927М.04.000 (рисунок 2) активной зоны реактора БН-800 (далее макеты гильзы СУЗ и ТВС). Натурные эксперименты, выполнены на базе экспериментальной лаборатории АО «ОКБМ Африкантов». Испытания на воздействие продольных ударных нагрузок проводились на копре свободного падения СТ-675 (копер К-4000). Измерения деформаций, возникающих в макетах ТВС и гильзы СУЗ при воздействии продольных ударных нагрузок, проводили методом тензометрии с использованием тензорезисторов типа FLA-5-11 и статодинамического информационно-измерительного комплекса MGCplus. Для оценки ускорений использовалась измерительная система: акселерометры типа 4339, измерительно-вычислительный комплекс MIC-200 с усилителем заряда ME-908. Высота падения варьировалась в интервале от 50 до 1500 мм. В процессе испытаний фиксировались деформации, ускорения и производился визуальный осмотр макетов. В таблицах 1 – 4 сопоставляются результаты расчетов и испытаний для макета ТВС и гильзы СУЗ.

Таблица 1 - Ускорения a (g) макета гильзы СУЗ, усредненные по сечению Б-Б

Высота падения, мм	50	100	200	1000	1500
Эксперимент	420	767	1458	2889	3847
Расчет	458	820	1429	3027	4020

Таблица 2 - Ускорения a (g) макета ТВС, усредненные по сечению Б-Б

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	1133	1688	1978	2449	2696	3559	1649
Расчет	1131	1535	2010	2456	2720	3470	1560

Таблица 3 – Напряжения в макете гильзы СУЗ, усредненные по сечению А-А

Высота падения, мм	50	100	200	1000	1500
Эксперимент	-57	-77	-104	-273	-303
Расчет	-57	-83	-112	-294	-324

Таблица 4 - Напряжения в макете ТВС, усредненные по сечению А-А

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	-71	-93	-128	-163	-224	-235	-412
Расчет	-78	-99	-140	-175	-229	-258	-382

Из сопоставления видно, что осевые напряжения и ускорения, определенные экспериментально и численно, качественно и количественно удовлетворительно совпадают (их расхождение не превышает 10 %). По результатам исследований подготовлен верификационный отчет и осуществлена аттестация ПК ANSYS/LS-DYNA в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.).

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования поведения конструкционных материалов ВТУК в зависимости от скорости деформации и температуры. Элементы рассматриваемых контейнеров обычно изготавливаются из сталей 08X18H10T (основной корпус), 20X13 (крепежные элементы), алюминиевого сплава АМг-6 (наполнитель контейнера), а так же из стали Ст3 (настил, с которым соударяется контейнер).

Для определения механических свойств сплавов при высокоскоростном нагружении использовался метод Кольского с различными вариантами разрезного стержня Гопкинсона. В результате получены диаграммы деформирования при различных режимах нагружения. По ним определены пределы прочности и их зависимость от скоростей деформаций и температуры. Для оценки изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации, проведено сопоставление результаты динамических и статических экспериментов. По результатам статических и динамических испытаний образцов при сжатии и растяжении определены механические характеристики конструкционных материалов (диаграммы деформирования, пределы текучести, временное сопротивление разрыву, модуль упрочнения, предельные характеристики пластичности и т.д.), получены параметры модели пластичности Джонсона-Кука. Отмечено, что исследованные стали имеют различную чувствительность механического поведения к скорости деформации и температуре. Так, динамическая диаграмма деформирования, соответствующая скорости деформаций $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$, для стали Ст3 выше статической кривой на 66 %, для стали 20X13 на 33 % и для стали 08X18H10T на 8%. В условиях повышенных температур (до 350°C) пределы текучести для стали Ст3 уменьшились на 24 %, для стали 20X13 на 23 % и для стали 08X18H10T на 20 %.

Для проверки адекватности модели пластичности Джонсона-Кука были использованы эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями, а также на динамическое сжатие цилиндрического образца в виде таблетки. Результаты верификации модели деформирования показали хорошее соответствие данных натурных испытаний и численного моделирования, как по остаточным формам образцов, так и по временным характеристикам динамики процесса пластического деформирования: их расхождение не превысило 9%.

В четвертой главе представлены результаты численного анализа аварийного падения ВТУК при транспортно-технологических операциях. Для численного исследования напряженно-деформированного состояния ВТУК: а) определены возможные сценарии аварий на основании анализа транспортно-технологического тракта; б) построены компьютерные

модели, отражающие реальные жесткостные и весовые характеристики исследуемых конструкций.

Общий вид ВТУК и конечно-элементные модели, использованные для анализа падения ВТУК на жесткое основание под различными углами, показаны на рисунках 3-6. Рассмотрены следующие возможные сценарии: а) падение с высоты 17,5 м в вертикальном положении ВТУК (рис.4), б) падение с высоты 7,1 м в горизонтальном положении ВТУК (рис.5), в) падение с высоты 7,1 м, ВТУК наклонен под углом 50° к горизонтальной плоскости (рис.6).

По расчетным данным в первом варианте задачи (рис.4), при отскоке ВТУК от жесткого основания происходит раскрытие основного разъема вследствие разрушения болтового соединения. По результатам серии вычислительных экспериментов было подобрано сечение данных конструктивных элементов, обеспечивающее герметичность ВТУК при аварийном падении. Последующий конечно-элементный анализ установил, что в усовершенствованной конструкции максимальные пластические деформации силового корпуса ВТУК образуются в зоне сопряжения дна с обечайкой корпуса. Вследствие этого происходит закусывание дна корпуса в днище, и днище совершает отскок вместе с ВТУК. Пластические деформации не превышают предельное значение $\varepsilon_{пред}$ и не приводят к разрушению. В зоне контакта с ТВС на дне ВТУК возникает локальная пластическая деформация смятия. При отскоке происходит соударение ТВС внутреннего ряда с крышкой ВТУК. Наружный ряд ТВС располагается на прогнутой части дна ВТУК, что приводит к внецентренному нагружению, изгибу и соударению ТВС с краем канала вытеснителя. Изгиб препятствует контакту наружного ряда ТВС с крышкой ВТУК. Наиболее нагруженными элементами ТВС являются обечайка хвостовика и конец хвостовика в зоне его контакта с дном ВТУК.

Во втором варианте задачи (рис.5) за счет взаимного смещения крышки и корпуса происходит срез болтов. Для разгрузки болтов от срезающего усилия в конструкцию крышки корпуса был введен опорный бурт. После доработки конструкции ВТУК по результатам расчёта были выявлены зоны пластических деформаций: а) болты крепления крышки с корпусом; б) нижняя часть фланца корпуса в месте контакта ВТУК с основанием; в) легкий корпус в местах контакта с жестким основанием; г) днище; д) силовой корпус ВТУК в зоне сопряжения обечайки корпуса с фланцем. Падение ВТУК в горизонтальном положении является наихудшим для ТВС, так как она в этом положении испытывает наибольший изгиб. Максимальные напряжения в ТВС возникают в начале отскока ВТУК вследствие движения ТВС и ВТУК в противофазе. Соударения консольных концов ТВС с корпусом ВТУК не происходит. Воздействие ТВС на корпус ВТУК происходит только через вытеснитель, что не приводит к разгерметизации ВТУК.

В третьем варианте задачи (рис.6) наиболее нагруженными элементами разъема ВТУК являются болты крепления крышки с корпусом и фланец корпуса в месте контакта ВТУК с

основанием. Пластические деформации образуются в следующих зонах: а) крышка корпуса и фланец в месте контакта с жестким основанием, б) легкий корпус в местах контакта с основанием, в) силовой корпус ВТУК в области сопряжения обечайки корпуса с фланцем. Максимальные напряжения и деформации в ТВС возникают после начала отскока, когда ВТУК начинает движение вверх, а консольные части ТВС по инерции продолжают движение вниз. Наиболее нагруженными элементами ТВС является обечайка корпуса консольного участка со стороны хвостовика в зоне контакта ТВС с краями канала вытеснителя. В результате движения ТВС и ВТУК в противофазе, ТВС контактирует с краем алюминиевого вытеснителя обечайкой корпуса консольного участка со стороны головки. Происходит закусывание ТВС в канале вытеснителя, что препятствует вылету ТВС из канала. Консольные части ТВС не выбирают зазор с корпусом ВТУК. Контакта ТВС с корпусом ВТУК не происходит.

Согласно расчетным данным толщина стенок основного корпуса ВТУК имеет не обоснованный запас прочности. За счет уменьшения толщины стенок удалось снизить металлоемкость конструкции на 20%. Конечно-элементный анализ конструкции ВТУК, усовершенствованной в соответствии с выработанными на основе проведенных расчетов рекомендациям, показал следующее. Наибольшую перегрузку ($\approx 189g$) в активной фазе соударения ВТУК и ТВС испытывают при вертикальном падении ($g=9,8m/s^2$ – ускорение свободного падения). Во втором и третьем вариантах задачи перегрузка ВТУК и ТВС составляет 80,25g и 30g соответственно. С точки зрения деформирования ТВС наиболее опасным является падение ВТУК в горизонтальном положении – в этом случае происходит упругопластический изгиб ТВС. Во всех рассматриваемых вариантах падения разъем усовершенствованного ВТУК не раскрывается, а в силовом корпусе образования сквозных трещин не происходит. Корпус ВТУК и ТВС испытывают пластические деформации, не приводящие к их разрушению. Выпадения ядерного топлива из ВТУК не происходит. Эксплуатация ВТУК после аварийного падения недопустима, а восстановление его работоспособного состояния нецелесообразно.

Основные результаты и выводы диссертационной работы формулируются следующим образом.

На основе расчетно-экспериментального подхода проведены динамические испытания конструкционных материалов ВТУК и ТВС. По результатам испытаний определены их диаграммы деформирования, пределы текучести, временное сопротивление разрыву, модуль упругости, предельные характеристики пластичности и т.д. Исследована чувствительность механического поведения конструкционных материалов ВТУК и ТВС к скорости деформации и температуре. Численно и экспериментально исследованы динамическое диагональное сжатие таблеток из этих материалов, внедрение в них конического и сферического инденторов. Результаты исследований позволили идентифицировать и верифицировать математическую модель упругопластического деформирования, предложенную Джонсоном-Куком. Библиотека

материалов ПК ANSYS/LS-DYNA дополнена базой экспериментальных данных для математических моделей поведения материалов при больших пластических деформациях и динамических воздействиях высокой интенсивности.

Выполнено расчетно-экспериментальное исследование деформирования макетов СУЗ и ТВС при их аварийном падении на жесткое основание. С применением полученных результатов проведена валидация программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Подготовлен верификационный отчет и осуществлена аттестация ПК ANSYS/LS-DYNA в НТИЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.).

На стадии проектирования выполнен комплексный теоретический и экспериментальный анализ прочности конструкции ВТУК при аварийном падении на жесткое основание, охватывающий технические, физико-механические, математические и нормативные аспекты проблемы. По результатам полномасштабного 3-D компьютерного моделирования в проект внесены рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности применительно к ситуациям, связанным с возможным падением ВТУК. Сделанные рекомендации позволили оптимизировать конструкцию ВТУК, повысить его надежность и снизить на 20% металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Рябцов А.В., Исхаков С.А. Расчётное моделирование радиационного формоизменения ТВС реакторов типа БН//Проблемы прочности и пластичности». Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2013, №75(1). С.33-39.

2. Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г., Рябцов А.В. Падение тяжелых предметов на реактор//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2013, №75(2). С.115-122.

3. Баженов В.Г., Кайдалов В.Б., Кибец А.И., Лапшин Д.А., Фролова И.А. Конечно-элементное решение задачи деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН при аварийном падении//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. Сб. Нижний Новгород. Изд-во ННГУ. 2015, Т.77, №3. С.266-274.

В других изданиях

4. Кайдалов В. Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г. Моделирование ударных процессов при проектировании оборудования обращения с топливом реакторных установок типа БН//Тезисы докладов VIII научно-технической конференции «Молодежь в науке». Нижегородская область, г. Саров, 2009. С.57.

5. Баженов В.Г., Кибец А.И., Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А. Конечно-элементный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН при аварийном падении//Тезисы XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное

моделирование в механике деформируемых сред и конструкций». 28-30 сентября 2015г. Санкт - Петербург. ИД «ФАРМиндекс». С.165-166.

6. Коротких Ю.Г., Панов В.А. Лапшин Д.А., Лебедева Я.Ю. Расчётно-экспериментальные исследования накопления повреждений в стали 08X18H10T при термомеханическом циклическом нагружении//Тезисы докладов 12-ой Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». СПб, 2012, С. 221-222.

7. Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Брагов А.М. Константинов А.Ю. Экспериментальное исследование характеристик деформирования и разрушения стали 08X18H10T//Тезисы докладов Международной научной конференции «Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики», 24 – 27 марта 2014г., г. Димитровград. С. 79.

8. Кайдалов В. Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г. Моделирование динамических воздействий при проектировании оборудования реакторных установок// Тезисы докладов. 7-10 октября 2014г. III Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», ОАО НИКИЭТ, г. Москва, с. 75-76.

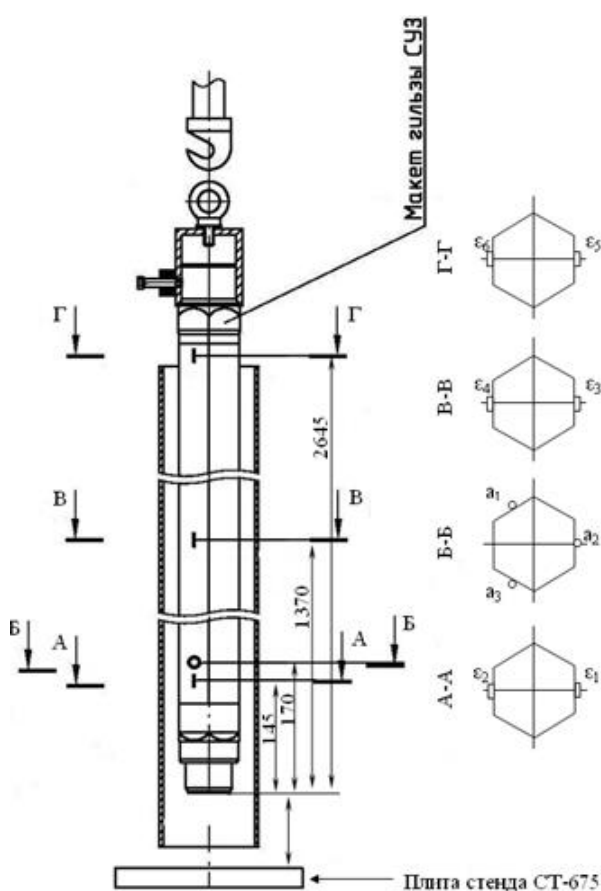


Рис.1 – Макет гильзы СУЗ

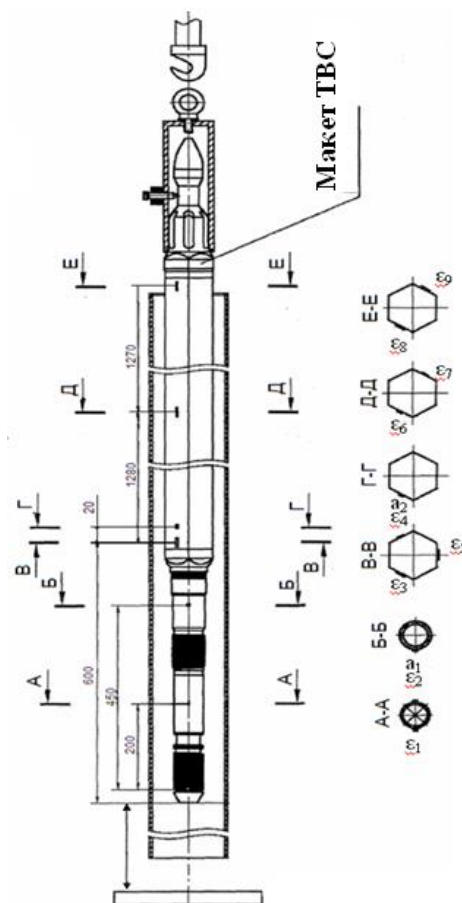


Рис. 2 - Макет ТВС

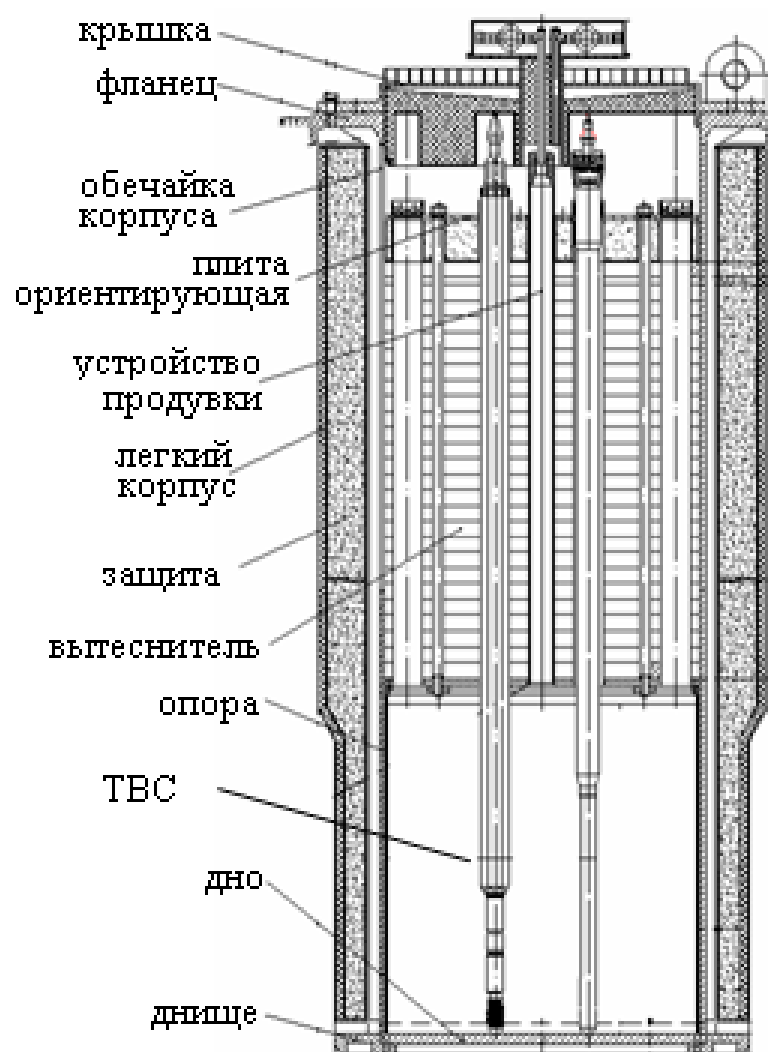


Рис. 3 – Общий вид ВТУК

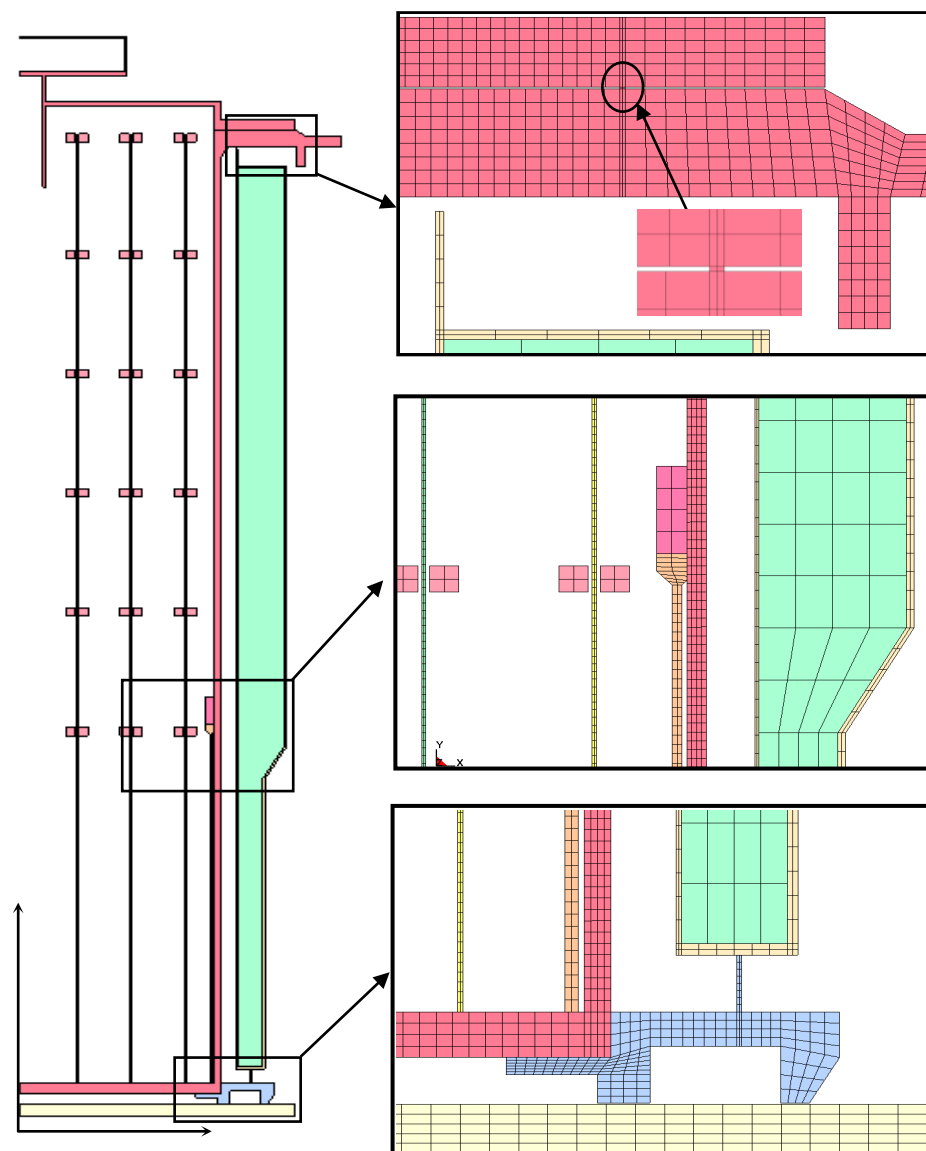


Рис. 4 – Расчетная модель ВТУК при падении в вертикальном положении

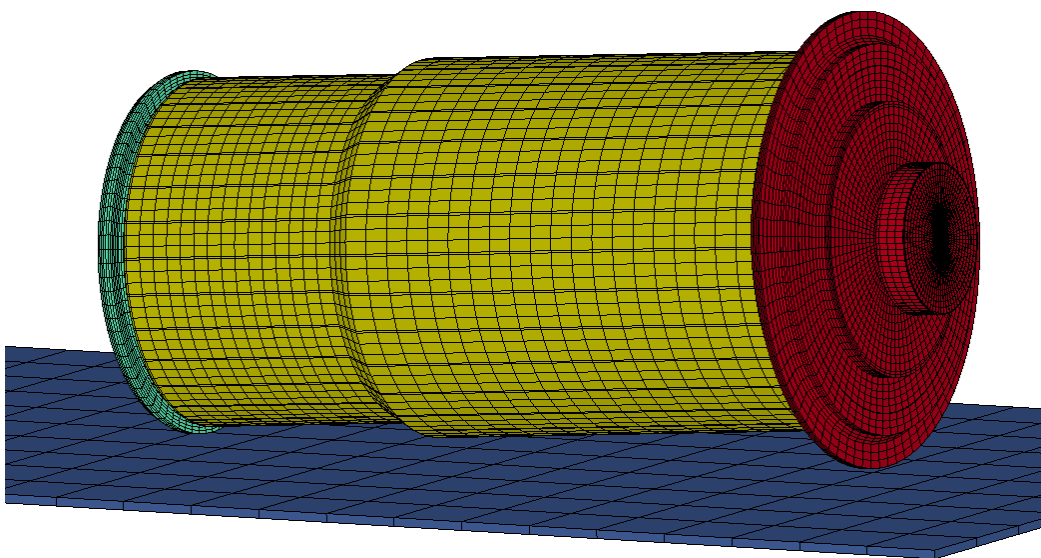


Рис. 5 – Расчетная модель ВТУК при падении в горизонтальном положении

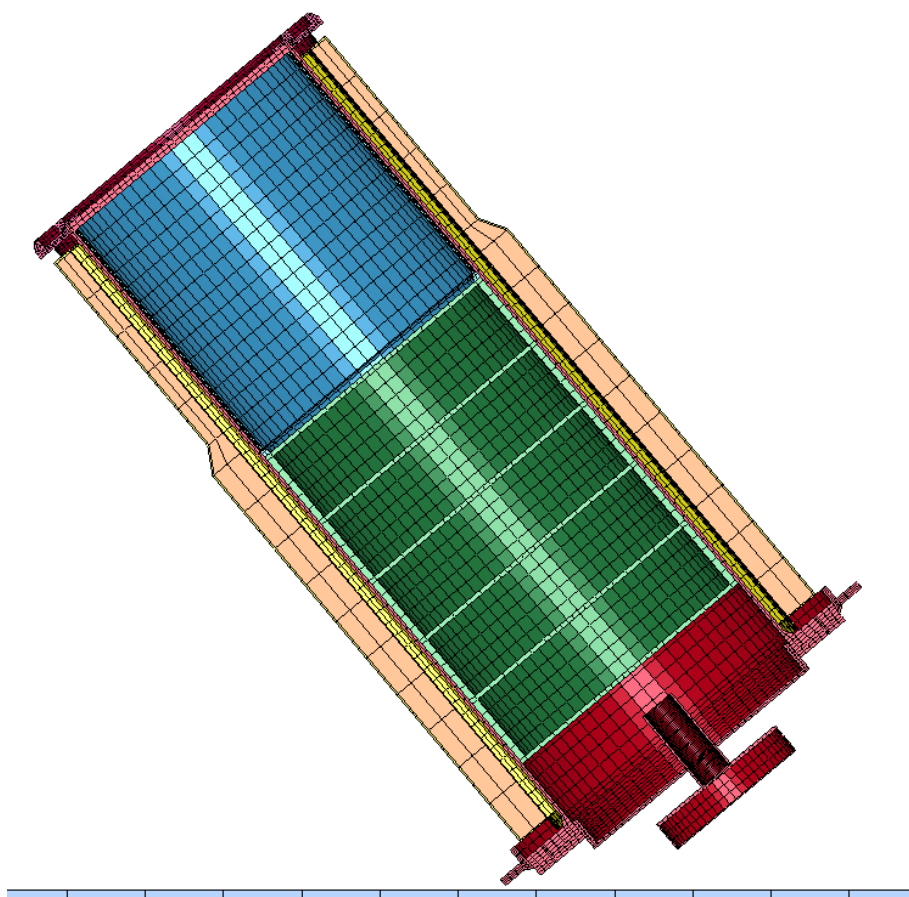


Рис. 6 – Расчетная модель ВТУК при падении под углом

Подписано в печать 29.10.2015 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 267. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37